

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2019.3.1.001

УДК 621.373.122; 621.396.967

Расчет параметров автодинов с жесткой характеристикой проводимости активного элемента

В. Я. Носков¹✉, С. М. Смольский²✉, К. А. Игнатков¹,
А. П. Чупахин¹

¹ Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия,
✉ noskov@oko-ek.ru

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, Россия,
✉ smolskiysm@mail.ru

Аннотация

Выполнены расчеты выходных, сигнальных и флуктуационных параметров и характеристик, а также параметров быстродействия автодинного генератора, находящегося под воздействием собственного отраженного излучения от объекта локации. Модель генератора представлена параллельным соединением проводимостей колебательной системы и активного элемента. Представлены результаты анализа зависимости указанных параметров и характеристик автодинов от режима работы генератора для случая жесткой характеристики средней за период колебаний проводимости активного элемента. Приведены для сравнения также результаты расчета для случая мягкой характеристики активного элемента. Результаты работы востребованы для инженерного расчета автодинных генераторов.

Ключевые слова

автодин, автодинный отклик, импедансная характеристика, шумовые параметры, сигнальные параметры

Для цитирования

Носков В. Я., Смольский С. М., Игнатков К. А., Чупахин А. П. Расчет параметров автодинов с жесткой характеристикой проводимости активного элемента. *Уральский радиотехнический журнал*. 2019;3(1):7–29. DOI: 10.15826/urej.2019.3.1.001

Calculation of autodyne parameters with the rigid characteristic of the active element conductance

V. Ya. Noskov¹✉, S. M. Smolskiy²✉, K. A. Ignatkov¹,
A. P. Chupahin¹

¹ Ural Federal University named
after the first President of Russia B. N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russian Federation,
✉ noskov@oko-ek.ru

² National Research University “Moscow Power Engineering Institute”,
Moscow, Russian Federation,
✉ smolskiysm@mail.ru

Abstract

Calculations of output, signal and fluctuation parameters and characteristics are made in the paper. The operation speed parameters of the autodyne oscillator, which is under the impact of the self-reflected emission from the radar target, are calculated. The oscillator model is presented by parallel connection of the oscillating system conductance and the active element conductance. The analysis results of the relationship between the mentioned parameters and autodyne characteristics upon the oscillator operation mode for the case of the rigid characteristic of averaged (for the oscillation period) conductance of the active element are discussed. The calculation results are given for the case of the soft characteristic of the active element for the comparison. These results are claimed for the engineering calculations of the autodyne oscillators.

Keywords

autodyne, autodyne response, impedance characteristic, noise parameters, signal parameters

For citation

Noskov V. Ya., Smolskiy S. M., Ignatkov K. A., Chupahin A. P. Calculation of autodyne parameters with the rigid characteristic of the active element conductance. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(1):7–29. DOI: 10.15826/urej.2019.3.1.001

1. Введение

Автодины являются простейшими многофункциональными устройствами, в которых автогенераторы одновременно выполняют функции передатчика зондирующего излучения и приемника отраженного от объекта локации сигнала. Принцип действия их основан на автодинном эффекте, который состоит в изменениях амплитуды и частоты генерации, а также параметров смещения (тока, напряжения) на активном элементе (АЭ). Выделение автодинного отклика генератора в виде низко-

частотного сигнала и его обработка обеспечивают возможность получения информации об отражающем объекте. С помощью автодинных устройств решается широкий круг задач в радиолокации, связи и измерительной технике [1–5].

Исследованиям особенностей формирования сигналов, изучению шумовых параметров и характеристик автодинов в различных режимах колебаний, посвящено достаточно большое число литературы (см., например, [6–11]). При этом в указанных работах рассмотрен только случай мягкой импедансной характеристики АЭ, когда средняя за период проводимость АЭ является однозначной функцией амплитуды колебаний. Однако для случая жесткой импедансной характеристики АЭ, когда указанное условие не выполняется, в известных нам работах данные параметры и характеристики не исследовались. Результаты таких исследований необходимы для правильного выбора коэффициента связи генератора с нагрузкой, типа прибора и рабочего смещения на характеристике АЭ, при которых обеспечиваются наилучшие условия для достижения требуемых параметров и характеристик генератора, как *автодина*.

Цель настоящей работы – на основе разработанной модели автодинного генератора выполнить исследование зависимости выходной мощности, передаточных, сигнальных и шумовых параметров, а также характеристик быстродействия от выбранного режима стационарных колебаний для случая жесткой импедансной характеристики АЭ. Основные результаты этой работы обсуждались на 25-й и 27-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» и частично на симпозиуме «9th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'16)» [8–15].

2. Выходные параметры стационарного режима

Основными выходными параметрами, характеризующими стационарный режим работы СВЧ-генераторов, в окрестности которого проявляется автодинный эффект, являются выходная мощность P_n , амплитуда A и частота ω генерации. Для нахождения этих параметров рассмотрим одноконтурную модель генератора в виде параллельного соединения проводимостей резонатора Y_p и нагрузки Y_n , а также средней за период колебаний «электронной» проводимости АЭ Y_s . Выражение для полной проводимости резонатора Y_p в окрестности его собственной частоты ω_c имеет вид: $Y_p = G_p + jB_p = G_p \{1 + j[2Q_p(\omega - \omega_c) / \omega_c]\}$, где G_p , B_p , Q_p – резистивная и реактивная проводимости резонатора и его соб-

ственная добротность соответственно. При этом аппроксимацию средней за период электронной проводимости АЭ $Y_s(A, \omega) = G_s + jB_s$ примем следующего вида [12]:

$$Y_s(A, \omega) = -G_{s0}[g_s(u_n) + v_g(\omega - \omega_0)/\omega_0] - jB_{s0}[1 - v_b(A - A_0)/A_0], \quad (1)$$

где G_{s0} , B_{s0} – резистивная и реактивная проводимости АЭ при отсутствии колебаний; A_0 , ω_0 – амплитуда и частота стационарных колебаний автономного генератора; $g_s(u_n)$ – модуль нормированной характеристики резистивной проводимости АЭ:

$$g_s(u_n) = 1 + c_g u_n^2 - (c_g + 1)u_n^4; \quad (2)$$

$u_n = A_0 / A_{\max}$ – нормированная амплитуда колебаний; A_{\max} – амплитуда колебаний на АЭ, при которой проводимость $g_s(u_n) = 0$; c_g , v_g , v_b – коэффициенты, определяющие зависимость проводимостей G_s и B_s АЭ от изменений амплитуды u_n и частоты ω генерации. В зависимости от значения коэффициента c_g функция (2) позволяет рассмотреть случаи как мягкой, так и жесткой импедансной характеристики АЭ.

Из условия баланса проводимостей $G_p + G_s = 0$ и $B_p + B_s = 0$ с учетом (1), (2) и нагрузки G_n находим частоту ω_0 и нормированную амплитуду u_n стационарных колебаний автономного генератора:

$$\omega_0 = \omega_c [1 + (\operatorname{tg} \Theta_0 / 2Q_n)], \quad (3)$$

$$u_n = \left[c_g + \sqrt{c_g^2 + 4(c_g + 1)(1 - g_p - g_n)} / 2(c_g + 1) \right]^{1/2}, \quad (4)$$

где $\Theta_0 = \arctg(B_{s0} / G_{s0})$ – фазовый угол запаздывания АЭ; $g_p = G_p / G_{s0}$; $g_n = G_n / G_{s0}$; Q_n – нагруженная добротность колебательной системы генератора:

$$Q_n = Q_p g_p / (g_p + g_n) = Q_p g_p / [1 + c_g u_n^2 - (c_g + 1)u_n^4]. \quad (5)$$

С учетом (4) легко получить выражение для выходной мощности: $P_n = A_0^2 G_n / 2 = P_\phi p_n$, где $P_\phi = A_{\max}^2 G_{s0} / 2$ – «формально» максимальная мощность АЭ; $p_n = P_n / P_\phi$ – нормированная зависимость выходной мощности генератора от величин нормированных проводимостей g_p и g_n :

$$p_n(g_n) = g_n \left[c_g + \sqrt{c_g^2 + 4(c_g + 1)(1 - g_p - g_n)} \right] / 2(c_g + 1). \quad (6)$$

Используя замену: $g_n = 1 - g_p + c_g u_n^2 - (c_g + 1)u_n^4$, получим зависимость p_n от величины напряжения u_n на АЭ:

$$p_n = [1 - g_p + c_g u_n^2 - (c_g + 1)u_n^4] u_n^2. \quad (7)$$

При этом должны выполняться условия устойчивости колебаний:

$$u_n \geq [c_g / 2(c_g + 1)]^{1/2} \quad \text{или} \quad g_n \leq 1 - g_p + [c_g^2 / 4(c_g + 1)]. \quad (8)$$

На рис. 1 представлены результаты вычислений согласно (2), (4), (6), (7) с учетом (8) в виде графиков $g_s(u_n)$, $u_n(g_n)$, $p_n(g_n)$ и $p_n(u_n)$, построенных при условии $\omega = \omega_0$ для различных значений коэффициента c_g . Как видно на полученных графиках, с увеличением коэффициента c_g данные характеристики все в большей степени проявляют свою «жесткость», при этом выходная мощность генератора значительно возрастает.

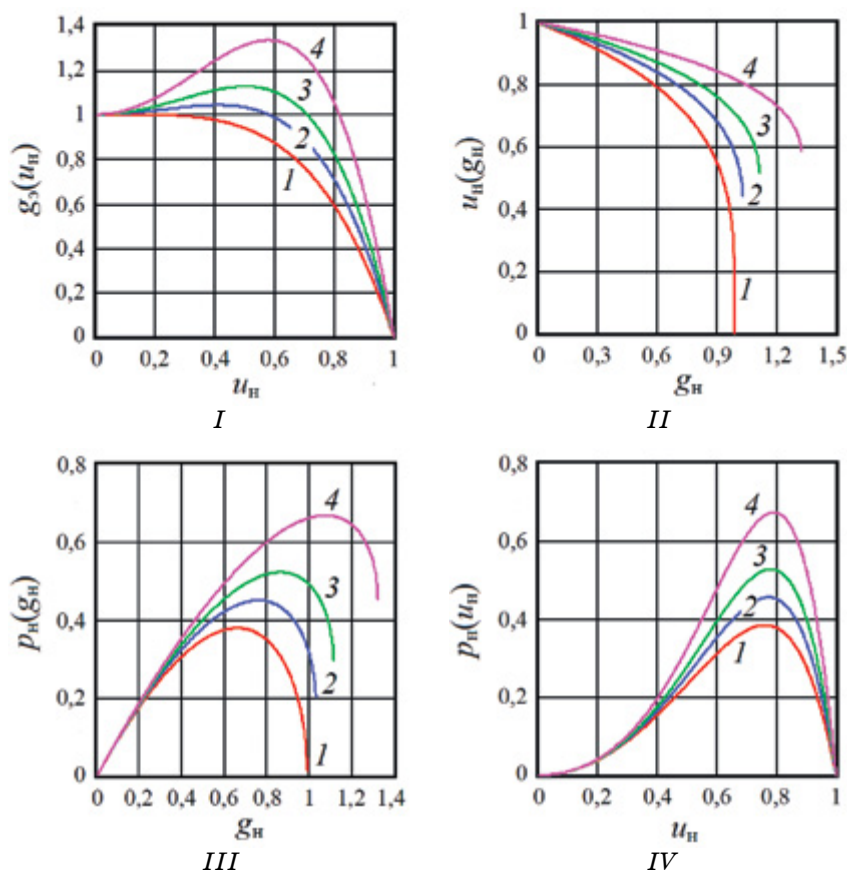


Рис. 1. Графики нормированных величин: $I - g_s(u_n)$; $II - u_n(g_n)$; $III - p_n(g_n)$; $IV - p_n(u_n)$, рассчитанных для различных значений коэффициента c_g : $c_g = 0$ (кривые 1); $c_g = 0,5$ (кривые 2); $c_g = 1$ (кривые 3); $c_g = 2$ (кривые 4)

Fig. 1. Plots of normalized modulus of $g_s(u_n)$ (I), $u_n(g_n)$ (II), $p_n(g_n)$ (III) и $p_n(u_n)$ (IV), calculated at various values of c_g coefficient: $c_g = 0$ (curves 1); $c_g = 0.5$ (curves 2); $c_g = 1$ (curves 3); $c_g = 2$ (curves 4)

При оптимальной связи генератора с нагрузкой, когда $g_n = g_{n(opt)}$, поступающая в нагрузку мощность $p_n(g_n)$ имеет максимальное значение (см. рис. 1, III). Если проводимость $g_n > g_{n(opt)}$,

то передаваемая в нагрузку мощность $p_n(g_n)$ превышает мощность, рассеиваемую в резонаторе. Данный случай принято называть режимом «пересвязи». В режиме «недосвязи», когда $g_n < g_{n(\text{opt})}$, мощность в нагрузке $p_n(g_n)$ становится меньше мощности в резонаторе. На рис. 1, IV область недосвязи находится справа от максимума мощности, где нормированная амплитуда u_n колебаний на АЭ больше амплитуды, при которой наблюдается максимум мощности в нагрузке: $u_n > u_{\text{max}}$, а пересвязи – слева, когда $u_n < u_{\text{max}}$. Полученные результаты анализа качественно согласуются с данными, представленными в работах [16; 17].

Анализ функций (6) и (7) на экстремум по параметрам g_n и u_n позволяет получить формулы для вычисления максимальной мощности $P_{\text{max}} = P_{\text{ф}} p_{\text{max}}$ генератора, выделяемой в нагрузку, а также оптимальных величин проводимости нагрузки $G_{n(\text{opt})} = G_{\text{э0}} g_{n(\text{opt})}$ и амплитуды колебаний u_{max} на АЭ. Здесь p_{max} – максимальные значения нормированных характеристик $p_n(g_n)$ и $p_n(u_n)$. Учитывая в реальных конструкциях СВЧ-генераторов выполнение неравенства $g_c \ll 1$, получим:

$$g_{n(\text{opt})} = \frac{2}{3} \left[1 + \frac{c_g}{6(c_g + 1)} (c_g + \sqrt{3(1 + c_g) + c_g^2}) \right], \quad (9)$$

$$u_{\text{max}} = \frac{A_{0(\text{opt})}}{A_{\text{max}}} = \sqrt{\frac{c_g + \sqrt{3(c_g + 1) + c_g^2}}{3(c_g + 1)}}. \quad (10)$$

3. Выражения для сигнальных параметров и характеристик

Автодинный эффект в различных генераторах состоит в изменениях параметров колебаний, которые описываются линейризованными в окрестности стационарного режима выражениями для относительных изменений амплитуды $a(\tau)$ и частоты $\chi(\tau)$ колебаний [18]:

$$a(\tau) = \Gamma K_a K(\Omega_a) \cos[\delta(\tau) - \psi], \quad (11)$$

$$\chi(\tau) = -\Gamma L_a L(\Omega_a) \sin[\delta(\tau) + \theta], \quad (12)$$

где $\Gamma = (P_c / P_n)^{1/2}$ – приведенный к выходу генератора коэффициент отражения; P_c – мощность принимаемого сигнала на проводимости нагрузки; $\delta(\tau) \equiv \delta(\tau_n)$ – набег фазы отраженного СВЧ-излучения:

$$\delta(\tau_n) = \tau_n - C_{\text{OC}} \sin[\delta(\tau_n) + \theta]; \quad (13)$$

$\tau_n = \omega_0 \tau$ – нормированное время; τ – время запаздывания отраженного излучения; $C_{\text{OC}} = \Gamma L_a \omega_0 \tau$ – параметр внешней обратной связи (ОС) автодинной системы «генератор – отражающий объ-

ект» [2]; K_a , L_a – коэффициенты автодинного усиления и автодинной девиации частоты соответственно:

$$K_a = \eta \sqrt{1 + \rho^2} / \alpha (1 - \gamma \rho), \quad L_a = \eta \sqrt{1 + \gamma^2} / Q_n (1 - \gamma \rho); \quad (14)$$

$K(\Omega_a)$, $L(\Omega_a)$ – нормированные параметры зависимостей коэффициентов автодинного усиления и девиации частоты генерации от частоты $\Omega_a = d\delta(\tau) / dt$ автодинного отклика соответственно [19]; η – КПД колебательной системы генератора:

$$\eta = g_n / (g_p + g_n) = \frac{1 - g_p + c_g u_n^2 - (c_g + 1) u_n^4}{1 + c_g u_n^2 - (c_g + 1) u_n^4}; \quad (15)$$

$\psi = \arctg(\rho)$, $\theta = \arctg(\gamma)$ – углы фазового смещения автодинных изменений амплитуды и частоты автоколебаний; γ и ρ – коэффициенты неизохронности и неизодромности генератора соответственно [18]:

$$\gamma = \beta / \alpha = -v_b \operatorname{tg} \Theta / 2u_n^2 [c_g - 2(c_g + 1)u_n^2], \quad (16)$$

$$\rho = \varepsilon / Q_n = v_g / 2Q_p g_p; \quad (17)$$

α , β , ε – дифференциальные параметры генератора, характеризующие его чувствительность к изменениям амплитуды и частоты колебаний в окрестности стационарного режима [18]:

$$\alpha = -u_n^2 [c_g - 2(c_g + 1)u_n^2] / [1 + c_g u_n^2 - (c_g + 1)u_n^4], \quad (18)$$

$$\beta = v_b \operatorname{tg} \Theta_0 / 2(g_n + g_p) = v_b \operatorname{tg} \Theta_0 / 2[1 + c_g u_n^2 - (c_g + 1)u_n^4], \quad (19)$$

$$\varepsilon = v_g / 2(g_n + g_p) = v_g / 2[1 + c_g u_n^2 - (c_g + 1)u_n^4]. \quad (20)$$

4. Коэффициенты передачи автодинного отклика

Рассмотрим основные параметры, характеризующие процесс приема, преобразования и прохождения отклика генератора на воздействие отраженного от объекта локации излучения. Этими параметрами являются коэффициенты автодинного усиления K_a и девиации частоты L_a [18]. Результаты вычислений согласно (14) с учетом (15)–(20) зависимостей $K_a(g_n)$, $K_a(u_n)$ и $L_a(g_n)$, $L_a(u_n)$ представлены на рис. 2, в виде семейства кривых, полученных, как и прежде, при тех же (см. рис. 1) значениях коэффициента c_g . Исходные данные для этих и последующих расчетов были приняты применительно к генератору на диоде Ганна 8-миллиметрового диапазона следующие: $g_p = 0,01$, $v_g = 1$, $\omega_0 = 2\pi \times 37,5 \times 10^9$, $Q_p = 200$.

На рис. 2 видно, что коэффициенты автодинного усиления K_a и девиации частоты L_a являются монотонными функциями проводимости нагрузки g_n и напряжения u_n . При приближе-

нии генератора к порогу срыва колебаний (8), где проводимость нагрузки достаточно велика, прочность предельного цикла α уменьшается. При этом коэффициенты K_a и L_a , характеризующие соответственно амплитудную и частотную чувствительности генератора к внешним воздействиям, значительно растут. При вариациях проводимости нагрузки g_n значения коэффициента автодинного усиления K_a могут быть как меньше единицы, так и значительно ее превышать, составляя десятки и сотни раз. Величина автодинной девиации частоты $\Delta\omega_m = \Gamma\omega_0 L_a$, которая определяется нагруженной добротностью Q_n , также зависит от режима работы генератора и может изменяться в широких пределах (см. кривые на рис. 2, III и IV).

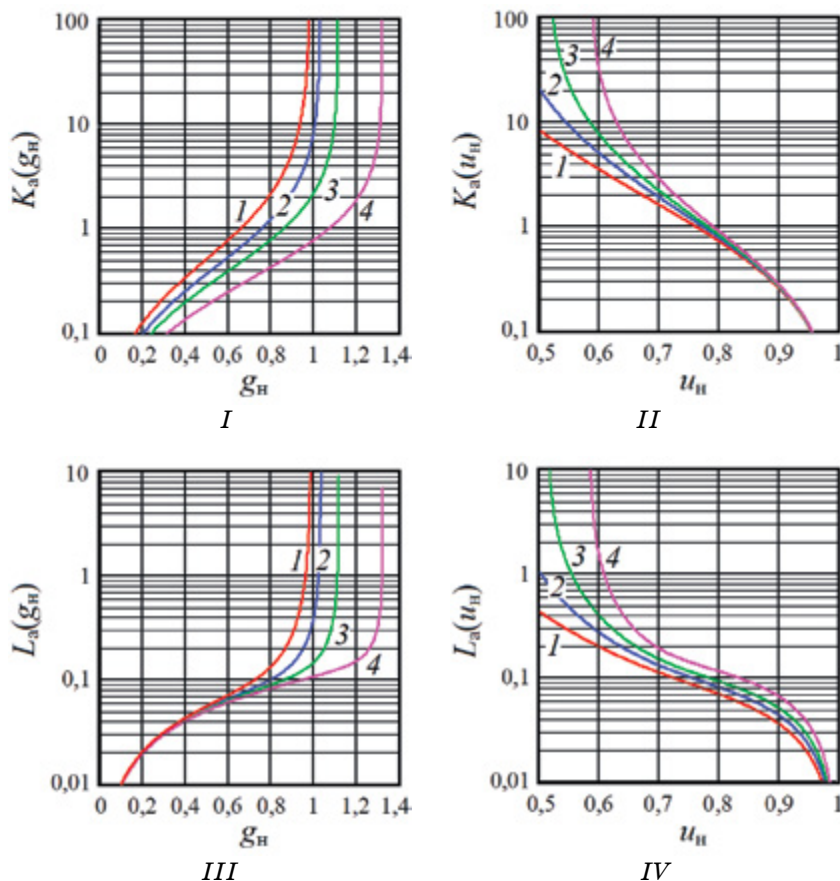


Рис. 2. Графики автодинных коэффициентов усиления: I – $K_a(g_n)$; II – $K_a(u_n)$ и девиации частоты III – $L_a(g_n)$; IV – $L_a(u_n)$, рассчитанные для различных значений c_g (см. рис. 1)

Fig. 2. Plots of autodyne amplification factors $K_a(g_n)$ (I), $K_a(u_n)$ (II), frequency deviation $L_a(g_n)$ (III), $L_a(u_n)$ (IV), calculated sat various values of c_g (see Fig. 1)

Анализ выражений (14) и кривых рис. 2 показал, что прочность предельного цикла α (18) является основной функцией, зависящей от режима колебаний генератора и влияющей на поведение зависимостей $K_a(g_n)$ и $K_a(u_n)$. Остальные составляющие, например обусловленные неизохронностью γ и неизодромностью ρ генератора, вносят незначительный вклад в характер поведения этих зависимостей. Применение режима работы генератора, при котором коэффициент $c_g > 0$, обеспечивает меньший выигрыш в величине коэффициентов K_a и L_a , чем при его малых значениях, когда $c_g \leq 0$. С приближением к режиму высоких значений проводимости g_n , где амплитуда колебаний мала, значения коэффициентов K_a и L_a быстро растут, особенно у характеристик с показателем $c_g = 2$.

Вспомогательными параметрами автодинов являются углы фазового смещения ψ и θ автодинных откликов по изменению амплитуды (11) и частоте (12). Анализ выражений (18)–(20) для этих параметров показал, что угол ψ в принятой здесь модели одноконтурного генератора от режима его работы не зависит. Он полностью определяется величиной коэффициента v_g . Для анализа поведения фазового угла θ на рис. 3 с учетом (16), (18) и (19) построены графики зависимостей $\theta(g_n)$ (I) и $\theta(u_n)$ (II) при различных значениях коэффициента c_g .

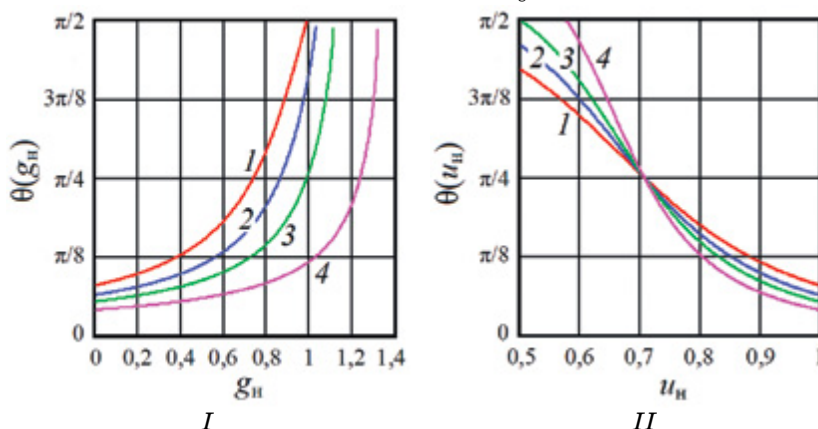


Рис. 3. Графики зависимостей угла смещения: I – $\theta(g_n)$; II – $\theta(u_n)$, рассчитанные для различных значений c_g (см. рис. 1)

Fig. 3. Plots of bias angle functions $\theta(g_n)$ (I), $\theta(u_n)$ (II), calculated sat various values of c_g (see Fig. 1)

На рис. 3 видно, что угол θ фазового смещения изменений частоты (12), оказывающий значительное влияние на характер искажения автодинных сигналов неизохронных генераторов, как при малых, так и больших значениях c_g слабо изменяется

при вариациях режима работы автодина. Этот угол преимущественно определяется величиной коэффициента u_b .

Особый интерес представляет поведение коэффициента передачи автодинного отклика по мощности K_p при изменении режима работы генератора. Данный коэффициент входит в выражение для «мощностной» характеристики автодина, описывающее вариации выходной мощности $\Delta P_n(\tau_n)$ генератора при изменении набега фазы $\delta(\tau_n)$ отраженного излучения:

$$\Delta P_n(\tau_n) = P_n(\tau_n) - P_{n0} = 2\Gamma^2 K_p \cos \delta(\tau_n), \quad (21)$$

где $P_n(\tau_n)$, P_{n0} – текущее значение мощности в нагрузке автодинного генератора и ее значение для автономного режима колебаний. Выражение для коэффициента передачи автодинного отклика по мощности в виде функции нормированного напряжения на АЭ имеет вид:

$$K_p(u_n) = 2K_a [1 + 2c_g u_n^2 - 3(c_g + 1)u_n^4] u_n^2. \quad (22)$$

На рис. 4 представлены результаты вычисления согласно (22) с учетом (4) в виде графиков $K_p(g_n)$ и $K_p(u_n)$, рассчитанные при различных значениях c_g .

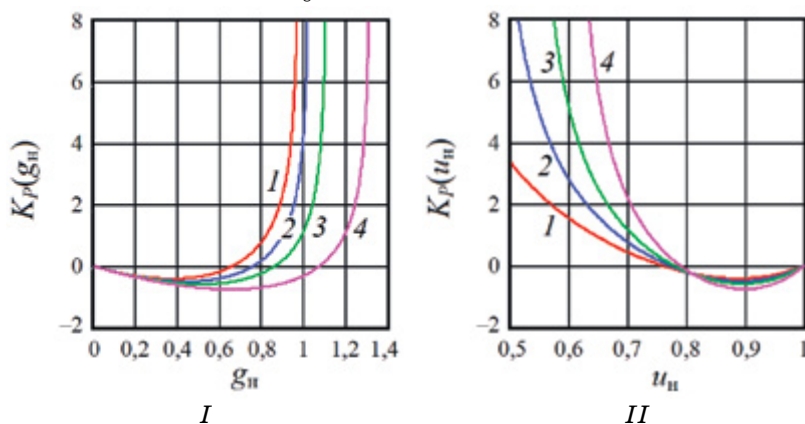


Рис. 4. Графики коэффициентов усиления мощности: I – $K_p(g_n)$, II – $K_p(u_n)$ автодинного сигнала, рассчитанные для различных значений c_g (см. рис. 1)

Fig. 4. Plots of power amplification factors $K_p(g_n)$ (I), $K_p(u_n)$ (II) of the autodyne signal calculated at various values of c_g (see Fig. 1)

Из сравнения графиков рис. 2 и рис. 4 видно, что коэффициент передачи K_p автодина зависит не только от величины выходной мощности генератора, определяемой также величиной коэффициента c_g , но и от характера связи генератора с нагрузкой. В случае оптимальной связи, когда выходная мощность наибольшая, имеем $K_p = 0$, а при переходе с режима недосвя-

зи к пересвязи и, наоборот, знак коэффициента K_p меняется на обратный. Данный характер поведения коэффициентов передачи по мощности подтверждается экспериментальными данными, представленными в обзоре [20].

5. Параметры быстродействия автодинных генераторов

Следующим важным параметром автодинов является постоянная времени τ_a автодинного отклика, которая характеризует быстродействие установления выходного сигнала на воздействие отраженного излучения, например, в автодинных системах с импульсной модуляцией излучения:

$$\tau_a = Q_n / [\omega_0 \alpha_{11} (1 - \gamma p)] = 2Q_p g_p / \omega_0 [n(1 - g_p - g_n) - (v_g v_b \operatorname{tg} \Theta) / 2Q_p g_p]. \quad (23)$$

Данный параметр также определяет формирование частотных зависимостей входящих в (11) и (12) коэффициентов автодинного усиления $K(\Omega_a)$ и девиации частоты $L(\Omega_a)$ генерации [19]:

$$K(\Omega_a) = \sqrt{\frac{(1 - \rho \Omega_n)^2 + (\rho + \Omega_n)^2}{(1 + \rho^2)(1 + \Omega_n^2)^2}}, \quad (24)$$

$$L(\Omega_a) = \sqrt{\frac{[1 + \gamma \Omega_n + (1 - \gamma p) \Omega_n^2]^2 + \gamma^2 (1 - \rho \Omega_n)^2}{(1 + \gamma^2)(1 + \Omega_n^2)^2}},$$

где $\Omega_n = \Omega_a \tau_a$ – нормированная частота автодинного отклика. При этом влияние коэффициента $K(\Omega_a)$ на формирование частотной характеристики автодинного отклика является превалирующим.

Из выражения для коэффициента $K(\Omega_a)$ в (24) несложно найти граничную частоту $F_{гр}$ (в Гц) автодинного отклика по уровню –3 дБ относительно максимального значения:

$$F_{гр} = 1 / 2\pi \tau_a. \quad (25)$$

Результаты вычислений постоянной времени τ_a (нс) и граничной частоты $F_{гр}$ (ГГц) в виде зависимостей $\tau_a(g_n)$, $\tau_a(u_n)$ и $F_{гр}(g_n)$, $F_{гр}(u_n)$, выполненные согласно (23) и (25), представлены на рис. 5 и 6 соответственно в виде семейства кривых, полученных при различных значениях коэффициента c_g .

На графиках этого рисунка видно, что при приближении генератора к порогу возбуждения, где проводимость нагрузки велика, а амплитуда колебаний мала, постоянная времени τ_a резко увеличивается, а граничная полоса пропускания квазигармонических сигналов автодинного отклика – значительно сужается. Как видно на кривых рис. 5 у генератора 8-миллиметрового диапазона постоянная времени τ_a может находиться в диапазоне от сотых долей до единиц наносекунд. При этом граничное значение F_{lim} полосы частот выходных сигналов автодина может

быть от десятков МГц до приблизительно одного ГГц (см. кривые рис. 6). Данные результаты вычислений хорошо согласуются с экспериментальными данными работ [21; 22].

Согласно графикам на рис. 5 также следует, что использование режима работы генератора, при котором реализуются большие значения коэффициента c_g , способствует уменьшению времени установления автодинного отклика и, соответственно, расширению полосы пропускания автодина.

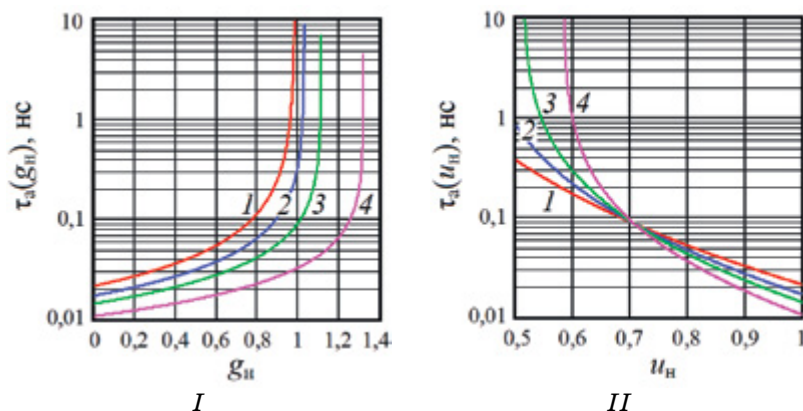


Рис. 5. Графики зависимостей постоянной времени автодинного отклика:

$I - \tau_a(g_n)$ и $II - \tau_a(u_n)$, рассчитанные для различных значений c_g (см. рис. 1)

Fig. 5. Plots of time constant of the autodyne response $\tau_a(g_n)$ (I) and $\tau_a(u_n)$ (II), calculated for various values of c_g (see Fig. 1)

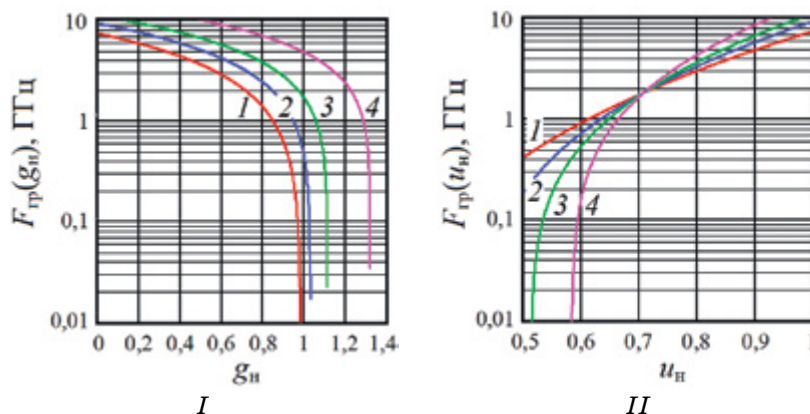


Рис. 6. Графики зависимостей граничной частоты автодинного отклика:

$I - F_{gp}(g_n)$ и $II - F_{gp}(u_n)$, рассчитанные для различных значений c_g (см. рис. 1)

Fig. 6. Plots of limited frequency of the autodyne response $F_{gp}(g_n)$ (I) and $F_{gp}(u_n)$ (II), calculated for various values of c_g (see Fig. 1)

6. Шумовые параметры и характеристики автодинов

Основными шумовыми параметрами автодинов являются эффективные значения частотных $\Delta f_{\text{эфф}}^{\text{ш}}$ и амплитудных $A_{\text{эфф}}^{\text{ш}}$ флуктуаций используемого генератора. Они определяют минимальный уровень сигнала, обнаруживаемого локатором. Кроме того, автодины, как радиолокационные устройства, характеризуются также энергетическим потенциалом Π , который определяет возможности автодинной системы по дальности действия, надежности обнаружения отражающих объектов и точности измерения их параметров. Еще одной важной характеристикой автодина, связанной с шумовыми параметрами, является ширина его динамического диапазона D .

Выражения для эффективных значений частотных $\Delta f_{\text{эфф}}^{\text{ш}}$ и амплитудных $A_{\text{эфф}}^{\text{ш}}$ шумов автодинного генератора имеют следующий вид [23]:

$$\Delta f_{\text{эфф}}^{\text{ш}} = \omega_0 \sqrt{2kT_{\text{ш}} M_{\text{ш}} \Delta F (1 + \gamma^2) / P_{\text{н}}} / 2\pi Q_{\text{н}} (1 - \gamma\rho), \quad (26)$$

$$A_{\text{эфф}}^{\text{ш}} = u_{\text{н}} A_{\text{max}} \sqrt{2kT_{\text{ш}} M_{\text{ш}} \Delta F (1 + \rho^2) / P_{\text{н}}} / \alpha (1 - \gamma\rho); \quad (27)$$

где $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $T_{\text{ш}}$, $M_{\text{ш}}$ – эквивалентная шумовая температура и мера шума АЭ.

Формулы для расчета энергетических потенциалов при регистрации сигнала по изменению частоты P_{F} и амплитуды P_{A} колебаний автодинной системы запишем в виде [24]:

$$P_{\text{F}} = \frac{Q_{\text{н}}^2 (1 - \gamma\rho)^2 P_{\text{н}}}{2kT_{\text{ш}} M_{\text{ш}} \Delta F (1 + \gamma^2)}, \quad P_{\text{A}} = \frac{\alpha^2 (1 - \gamma\rho)^2 P_{\text{н}}}{2kT_{\text{ш}} M_{\text{ш}} \Delta F (1 + \rho^2)}. \quad (28)$$

Отношение предельного уровня коэффициента отражения Γ_{lim} , при котором начинаются скачки сигнала, к уровню собственных частотных шумов СВЧ-генератора, дает значение искомого динамического диапазона D автодинной системы [25]:

$$D = \Gamma_{\text{lim}} \sqrt{\Pi} = R / R_{\text{с}}; \quad (29)$$

где R – пороговое расстояние до отражающего объекта, выраженное в числе полудлин волн излучения, на котором уровни отраженного излучения и собственных частотных шумов генератора равны; $R_{\text{с}}$ – тоже, но текущее расстояние до отражающего объекта. В общем виде выражение для вычисления порогового расстояний R имеет вид:

$$R = (1 / 2\pi\eta) Q_{\text{н}} (1 - \gamma\rho) \sqrt{\Pi / (1 + \gamma^2)}. \quad (30)$$

Результаты вычислений согласно (26) и (27) с учетом (5), (15)–(20) зависимостей $\Delta f_{\text{эфф}}^{\text{ш}}(g_{\text{н}})$, $\Delta f_{\text{эфф}}^{\text{ш}}(u_{\text{н}})$ и $A_{\text{эфф}}^{\text{ш}}(g_{\text{н}})$, $A_{\text{эфф}}^{\text{ш}}(u_{\text{н}})$ представлены на рис. 7 в виде семейства графиков при различных значениях коэффициента $c_{\text{г}}$. Аналогичные зависимости, полу-

ченные в результате вычислений потенциалов по формулам (28), представлены на графиках рис. 8. Исходные данные для расчетов приняты следующие: $T_{\text{ш}} = 300 \text{ K}$; $M_{\text{ш}} = 33 \text{ дБ}$; $\Delta F = 1 \text{ кГц}$; $A_{\text{max}} = 4 \text{ В}$, $G_{\text{э}0} = 0,03 \text{ Ом}^{-1}$.

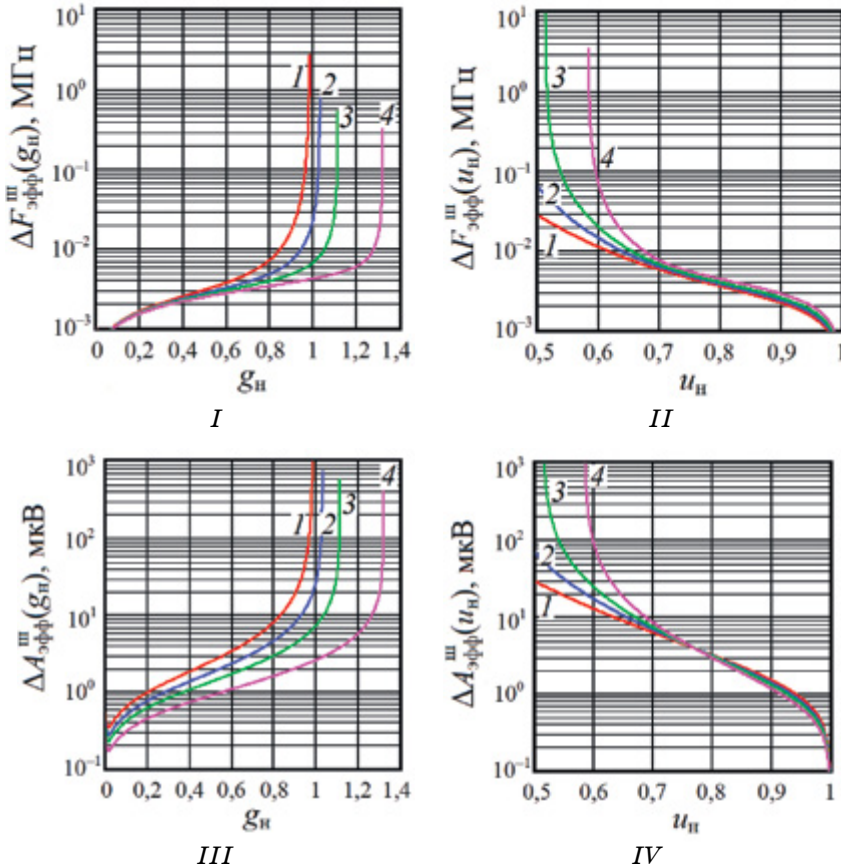


Рис. 7. Графики эффективных значений:

$I - \Delta f_{\text{эфф}}^{\text{ш}}(g_{\text{н}})$; $II - \Delta f_{\text{эфф}}^{\text{ш}}(u_{\text{н}})$ и $III - A_{\text{эфф}}^{\text{ш}}(g_{\text{н}})$; $IV - A_{\text{эфф}}^{\text{ш}}(u_{\text{н}})$, рассчитанных для различных значений коэффициента c_g (см. рис. 1)

Fig. 7. Plots of effective values

of $\Delta f_{\text{эфф}}^{\text{ш}}(g_{\text{н}})$ (I), $\Delta f_{\text{эфф}}^{\text{ш}}(u_{\text{н}})$ (II) and $A_{\text{эфф}}^{\text{ш}}(g_{\text{н}})$ (III), $A_{\text{эфф}}^{\text{ш}}(u_{\text{н}})$ (IV), calculated for various values of the coefficient c_g (see Fig. 1)

На рис. 7 и 8 видно, что полученные кривые в отличие от случая мягкой импедансной характеристики [10] имеют монотонный характер зависимостей. При малых значениях проводимости нагрузки $g_{\text{н}}$, где амплитуда колебаний $u_{\text{н}}$ достаточно большая, генератор обеспечивает режим работы с минимальным уровнем частотных $\Delta f_{\text{эфф}}^{\text{ш}}$ и амплитудных $A_{\text{эфф}}^{\text{ш}}$ шумов. При этом характеристики Π_F и Π_A имеют обратный характер. Мак-

симальным значениям потенциалов соответствуют минимальные уровни эффективных значений шумов.

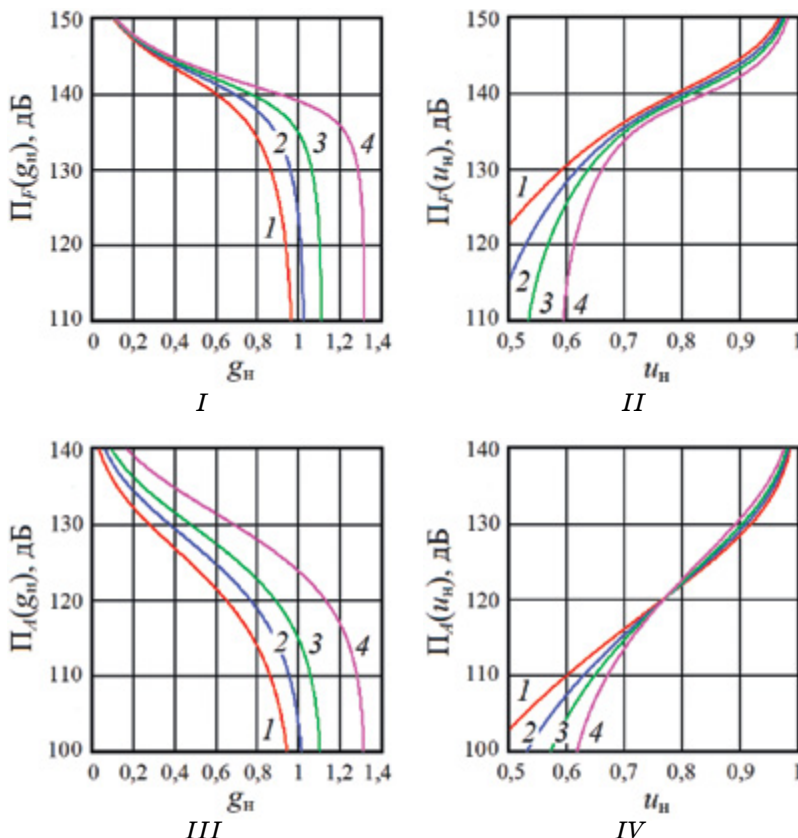


Рис. 8. Графики функций:
 $I - \Pi_F(g_n)$; $II - \Pi_F(u_n)$ и $III - \Pi_A(g_n)$; $IV - \Pi_A(u_n)$,
 рассчитанных для различных значений c_g (см. рис. 1)

Fig. 8. Plots
 of $\Pi_F(g_n)$ (I), $\Pi_F(u_n)$ (II) and $\Pi_A(g_n)$ (III), $\Pi_A(u_n)$ (IV),
 calculated for various values of c_g (see Fig. 1)

Из сравнения графиков нормированной амплитуды $u_n(g_n)$ и выходной мощности $p_n(g_n)$, представленных на рис. 1, II, с графиками рис. 7 и 8 следует, что для обеспечения наибольшего потенциала предпочтительно применение генератора в режиме недосвязи с нагрузкой. При этом амплитуда колебаний u_n находится вблизи ее максимальных значений A_{\max} , а выходная мощность P_n – в несколько раз меньше ее наибольшего значения. Автодины, выполненные на основе АЭ с жесткой характеристикой, обеспечивают выигрыш в величине потенциала на 10...20 дБ по сравнению с автодинами, использующими АЭ с мягкой характеристикой [10]. При этом обоим типам импедансных характери-

стик свойственно преобладание величины потенциала автодина при регистрации сигналов по изменению частоты Π_F генерации (на 20...30 дБ) по сравнению с регистрацией сигналов по изменению амплитуды Π_A .

Из результатов расчетов при иных значениях относительной проводимости g_p следует, что применение резонатора с высокой собственной добротностью Q_p способствует получению низких уровней флуктуаций, что согласуется с известными положениями теории шумов автогенераторов. Еще один вывод из полученных результатов состоит в том, что с увеличением коэффициента c_g наблюдается заметное улучшение качественных показателей автодинов, особенно величины потенциала Π_A . Таким образом, применение АЭ с жестким видом импедансной характеристики является предпочтительным.

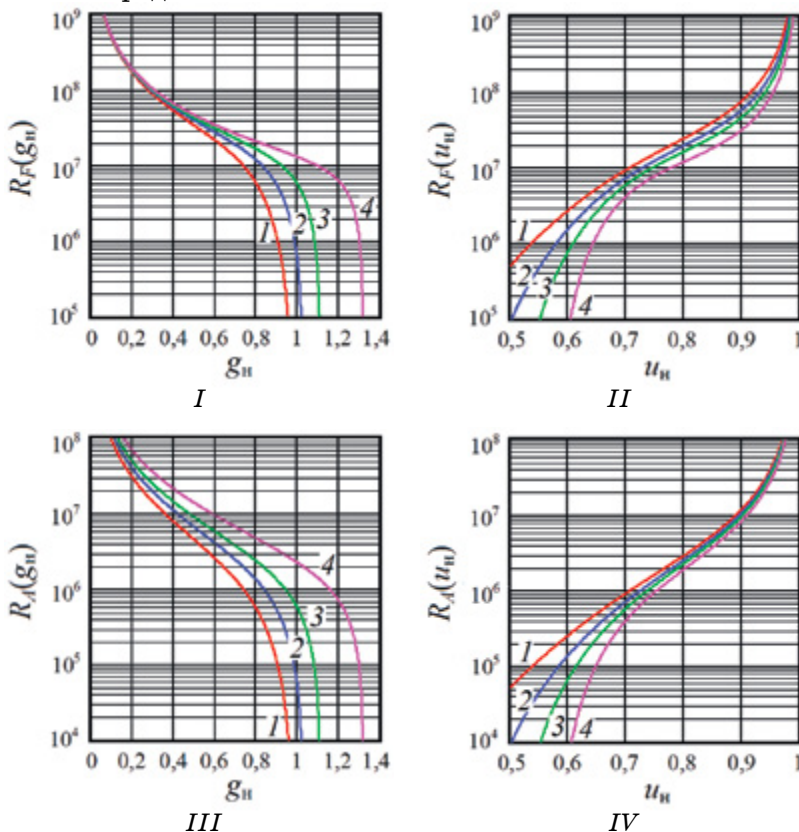


Fig. 9. Графики зависимостей:
 I – $R_F(g_n)$; II – $R_F(u_n)$ и III – $R_A(g_n)$; IV – $R_A(u_n)$,
 рассчитанные для различных значений c_g (см. рис. 1)

Fig. 9. Plots of functions
 $R_F(g_n)$ (I), $R_F(u_n)$ (II) and $R_A(g_n)$ (III), $R_A(u_n)$ (IV),
 calculated for various values of c_g (see Fig. 1)

На рис. 9 представлены¹ графики зависимостей $R(g_n)$ и $R(u_n)$ максимальных расстояний до отражающего объекта, выраженных в числе полудлин волн. Вычисления для построения этих графиков выполнялись согласно (30) с учетом (5) и (15)–(20), (28). Наполученных графиках, а также кривых рис. 8 видно, что области параметров генератора, где потенциал автодина максимальный, соответствует также область, где динамический диапазон системы наибольший. При этом рост динамического диапазона в этой области режима колебаний генератора связан не только с минимумом уровня его шумов, но и уменьшением автодинной девиации частоты (см. рис. 2, III и IV).

Данные экспериментальных исследований, представленные в работах [11; 23; 25] на примере автодинных генераторов на диодах Ганна, качественно подтверждают полученные выше результаты анализа шумовых параметров и характеристик.

7. Заключение

На основе разработанной ранее модели выполнены расчеты зависимости основных параметров автодинов, таких как выходная мощность, коэффициенты передачи, энергетический потенциал и динамический диапазон, а также шумовых параметров и параметров быстрогодействия от режима колебаний на АЭ и вида (мягкий, жесткий) его импедансной характеристики.

Из анализа полученных результатов расчетов следует, что как при жесткой, так и мягкой импедансной характеристике коэффициент автодинного усиления возрастает с приближением генератора к точке, где прочность предельного цикла наименьшая. При этом в случае мягкой характеристики данной точке соответствует режим малых колебаний на АЭ, а в случае жесткой – больших значений амплитуды колебаний и выходной мощности генератора. Область оптимальных значений связи генератора с нагрузкой находится в промежутке между реализацией максимальных значений коэффициента усиления автодина и его быстрогодействия.

Показано, что в случае регистрации автодинного сигнала по мощности при изменении нагрузки генератора от режима недосвязи к пересвязи автодинный сигнал инвертируется. В случае оптимальной связи генератора, когда выходная мощность наибольшая, автодинная чувствительность по изменению выходной мощности наименьшая и выходной отклик обусловлен только изменениями частоты и амплитуды генерации.

¹ Индексы F и A при R на графиках рис. 9 означают принадлежность данной зависимости к определению динамического диапазона при регистрации по изменению частоты и амплитуды соответственно.

Из результатов выполненных исследований также следует, что при выборе типа и режима работы АЭ для автодинного генератора, обеспечивающего наибольшее значение энергетического потенциала системы, необходимо использовать тип АЭ и положение рабочей точки по величине смещения такие, которые обеспечивают жесткий вид импедансной характеристики АЭ. При этом необходимо устанавливать режим слабой связи генератора с нагрузкой, обеспечивая относительно высокие значения амплитуды колебаний на АЭ, когда выходная мощность генератора в несколько раз меньше мощности, отдаваемой этим генератором в нагрузку в режиме оптимальной связи. Колебательная система генератора должна обеспечивать по возможности высокие значения собственной добротности, а АЭ – наименьшее значение меры шума. При этом необходимо отметить, что режим наилучшего энергетического потенциала автодина отличается от режима оптимальной связи по мощности, а также максимального значения коэффициентов передачи автодинного отклика.

Полученные в работе результаты исследований, расчетные соотношения и графики различных зависимостей от значений нормированной нагрузки и относительной амплитуды колебаний представляются полезными для инженерного расчета параметров и характеристик, а также нахождения оптимальных режимов работы автодинных СВЧ-генераторов, выполненных на основе диодов Ганна и других типов АЭ.

Список литературы

1. Komarov I. V., Smolskiy S. M. *Fundamentals of Short-Range FM Radar*. Norwood: Artech House, 2003.
2. Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Скрипаль Ан. В. *Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов*. Саратов: Изд-во СГУ; 2003.
3. Данилин А. И., Воторопин С. Д., Чернявский А. Ж. Использование автодинных приемопередающих модулей на диодах Ганна для определения деформаций лопаток турбомашин. В: *11-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2001)*, Севастополь, 10–14 сент. 2001 г. Севастополь: Вебер; 2001. С. 654–656.
4. Ermak G. P., Popov I. V., Vasilev A. S. et al. Radar sensors for hump yard and rail crossing applications. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2012;71(6):567–580. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v71.i6.80
5. Носков В. Я., Варавин А. В., Васильев А. С. и др. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 9. Радиолокационное применение автодинов. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2016;(3):32–86.

6. Моросанов С. А., Смольский С. М. Оптимизация режима и расчет автодинов на туннельных диодах. *Радиотехника*. 1981;36(2):84–88.
7. Терещенко А. Ф., Декин Г. Н. Оптимизация режима автодина на диоде Ганна. *Радиотехника*. 1983;(3):30–33.
8. Игнатков К. А., Чупахин А. П. Параметры стационарного режима автодинного генератора. В: *25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2015)*, Севастополь, 6–12 сент. 2015 г. Севастополь; 2015. С. 975–976.
9. Игнатков К. А., Чупахин А. П. Влияние режима работы генератора на коэффициенты передачи автодинного отклика. В: *25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2015)*, Севастополь, 6–12 сент. 2015 г. Севастополь; 2015. С. 995–996.
10. Игнатков К. А., Смольский С. М., Чупахин А. П. Зависимость шумовых параметров и характеристик автодинов от режима работы генератора. В: *25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2015)*, Севастополь, 6–12 сент. 2015 г. Севастополь; 2015. С. 997–1000.
11. Носков В. Я., Игнатков К. А., Смольский С. М., Чупахин А. П. Зависимость автодинных характеристик от режима работы генератора. В: *25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2015)*, Севастополь, 6–12 сент. 2015 г. Севастополь; 2015. С. 992–994.
12. Носков В. Я., Чупахин А. П. Влияние вида импедансной характеристики активного элемента автодина на его передаточные функции. В: *26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2016)*, Севастополь, 4–10 сент. 2016 г. Севастополь; 2016. Т. 10. С. 2180–2186.
13. Носков В. Я., Чупахин А. П. Влияние вида нелинейности активного элемента автодина на его шумовые параметры. В: *26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2016)*, Севастополь, 4–10 сент. 2016 г. Севастополь; 2016. Т. 10. С. 2187–2193.
14. Noskov V. Ya., Mishin D. Ya., Vasiliev A. V., Ermak G. P. Dependence of processing speed on the autodyne operation mode. In: *9th International Kharkov symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves (MSMW'16)*. Kharkov; 2016. E-27. P. 1–4. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538100
15. Игнатков К. А., Мишин Д. Я. Параметры быстродействия автодинных преобразователей частоты миллиметрового диапазона длин волн. В: *26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2016)*, Севастополь, 4–10 сент. 2016 г. Севастополь; 2016. Т. 10. С. 2194–2200.
16. Андреев В. С. Влияние нелинейных свойств прибора с отрицательным сопротивлением на мощность генерируемых колебаний. *Радиотехника*. 1982;(8):43–44.
17. Булгаков Б. М., Скресанов В. Н., Фисун А. И., Шубный А. И. Эффективность генератора на диоде Ганна с квазиоптическим резонатором. *Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ*. 1984;(3):13–19.

18. Носков В. Я., Игнатков К. А., Смольский С. М. Зависимость автодинных характеристик от внутренних параметров СВЧ генераторов. *Радиотехника*. 2012;(6):24–42.

19. Носков В. Я., Игнатков К. А. Влияние внутренних параметров автодинных СВЧ-генераторов на их динамические характеристики. *Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника*. 2012;(3):23–40.

20. Воторопин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 2. Теоретические и экспериментальные исследования. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2007;(7):3–33.

21. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Smolskiy S. M. Determination of autodyne oscillator parameters by the beating method. *Telecommunication Sciences*. 2012;3(1):35–45.

22. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Smolskiy S. M. Modulation characteristics of microwave autodyne oscillators. *Telecommunication Sciences*. 2012;3(2):44–52.

23. Носков В. Я., Игнатков К. А. Особенности шумовых характеристик автодинов при сильной внешней обратной связи. *Известия вузов. Физика*. 2013;56(12):112–124. DOI: 10.1007/s11182-014-0198-6

24. Noskov V. Ya., Ermak G. P. Signal and fluctuation characteristics of autodyne vibration and displacement meters. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2014;73(19):1727–1743. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i19.30

25. Noskov V. Ya., Ermak G. P. Measurement errors and dynamic range of autodyne vibration meters. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2014;73(20):1843–1861. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i20.50

References

1. Komarov I. V., Smolskiy S. M. *Fundamentals of Short-Range FM Radar*. Norwood: Artech House, 2003.

2. Usanov D. A., Scripal Al. V., Scripal An. V. *Physics of Semiconductor RF and Optical Autodynes*. Saratov: Saratov University Publisher; 2003. (In Russ.)

3. Danilin A. I., Votoropin S. D., Chernyavskii A. Zh. Using of autodyne transceiver modules on Gunn diodes for determination of turbomachine bladders deformations. In: *11th International conference "Microwave & telecommunication technology", Sevastopol, 2001, September 10–11*. Sevastopol: Veber, 2001, pp. 654–656. (In Russ.)

4. Ermak G. P., Popov I. V., Vasilev A. S. et al. Radar sensors for hump yard and rail crossing applications. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2012;71(6):567–580. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v71.i6.80

5. Noskov V. Ya., Varavin A. V., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Zakarlyuk N. M., Ignatkov K. A., Smolskiy S. M. Modern hybrid-integrated autodyne oscillators of microwave and millimeter wave ranges and their application. Part 9. Autodyne radar applications. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki = Achievements of Modern Radioelectronics*. 2016;(3):32–86. (In Russ.)

6. Morosanov S. A., Smolskiy S. M. Optimization mode and calculation autodynes tunnel diode. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 1981;36(2):84–88. (In Russ.)

7. Tereshchenko A. F., Dekin G. N. Optimization mode autodynes on the Gunn-Diode. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 1983;(3):30–33. (In Russ.)

8. Ignatkov K. A., Chupahin A. P. Steady-state mode parameters of the autodyne oscillator. In: *25th International Crimean Conference “Microwave and Telecommunication Technology”, Sevastopol, 2015, September 6–12*. Sevastopol; 2015, pp. 975–976. (In Russ.)

9. Ignatkov K. A., Chupahin A. P. Influence of the oscillator operation mode on transfer coefficients of the autodyne response. In: *25th International Crimean Conference “Microwave and Telecommunication Technology”, Sevastopol, 2015, September 6–12*. Sevastopol; 2015, pp. 995–996. (In Russ.)

10. Ignatkov K. A., Smolskiy S. M., Chupahin A. P. Dependence of noise parameters and autodyne characteristics on the oscillator operation mode. In: *25th International Crimean Conference “Microwave and Telecommunication Technology”, Sevastopol, 2015, September 6–12*. Sevastopol; 2015, pp. 997–1000. (In Russ.)

11. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Smolskiy S. M., Chupahin A. P. Autodyne characteristic dependence upon the oscillator operation mode. In: *25th International Crimean Conference “Microwave and Telecommunication Technology”, Sevastopol, 2015, September 6–12*. Sevastopol; 2015, pp. 992–994. (In Russ.)

12. Noskov V. Ya., Chupahin A. P. Influence of the impedance characteristic type of an autodyne active element on its transfer functions. In: *26th International Crimean Conference “Microwave and Telecommunication Technology”, Sevastopol, 2016, September 4–10*. Sevastopol; 2016, vol. 10, pp. 2180–2186. (In Russ.)

13. Noskov V. Ya., Chupahin A. P. Influence of non-linearity type of the autodyne active element upon its noise parameters. In: *26th International Crimean Conference “Microwave and Telecommunication Technology”, Sevastopol, 2016, September 4–10*. Sevastopol; 2016, vol. 10, pp. 2187–2193. (In Russ.)

14. Noskov V. Ya., Mishin D. Ya., Vasyliiev A. V., Ermak G. P. Dependence of processing speed on the autodyne operation mode. In: *9th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW’16), Kharkov, 2016, June 20–24*. Kharkov; 2016, E-27, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538100

15. Ignatkov K. A., Mishin D. Ya. Processing speed parameters of autodyne frequency converters for mm-range of wavelength. In: *26th International Crimean Conference “Microwave and Telecommunication Technology”, Sevastopol, 2016, September 4–10*. Sevastopol; 2016, vol. 10, pp. 2194–2200. (In Russ.)

16. Andreev V. S. The influence of the nonlinear properties of the device with negative resistance on the power oscillations. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 1982;(8):43–44. (In Russ.)

17. Bulgakov B. M., Skresanov V. N., Fisun A. I., Shubnii A. I. Energy generator performance with a quasi-optical resonator Gunn-diode. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 1. Elektronika SVCh*. 1984;(3):13–19. (In Russ.)

18. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Smolskiy S. M. Autodyne characteristic dependence on the uhf oscillator's inherent parameters. *Radioelekhnika = Radioengineering*. 2012;(6):24–42. (In Russ.)

19. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Internal parameter influence of autodyne UHF oscillators upon its dynamic characteristics. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 1. Elektronika SVCh*. 2012;(3):23–40. (In Russ.)

20. Votoropin S. D., Noskov V. Ya., Smolskiy S. M. Modern hybrid-integrated autodyne oscillators of microwave and millimeter ranges and their application. Part 2. Theoretical and experimental investigations. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki = Achievements of Modern Radioelectronics*. 2007;(7):3–33. (In Russ.)

21. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Smolskiy S. M. Determination of autodyne oscillator parameters by the beating metod. *Telecommunication Sciences*. 2012;3(1):35–45.

22. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Smolskiy S. M. Modulation characteristics of microwave autodyne oscillators. *Telecommunication Sciences*. 2012;3(2):44–52.

23. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Peculiarities of noise characteristics of autodynes under strong external feedback. *Russian Physics Journal*. 2013;56(12):112–124. DOI: 10.1007/s11182-014-0198-6

24. Noskov V. Ya., Ermak G. P. Signal and fluctuation characteristics of autodyne vibration and displacement meters. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2014;73(19):1727–1743. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i19.30

25. Noskov V. Ya., Ermak G. P. Measurement errors and dynamic range of autodyne vibration meters. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2014;73(20):1843–1861. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i20.50

Информация об авторах

Носков Владислав Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (620078, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32); e-mail: noskov@oko-ek.ru.

Смольский Сергей Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры формирования и обработки радиосигналов, заместитель директора Института радиотехники и электроники Национального исследовательского университета «МЭИ» (111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14); e-mail: smolskiysm@mail.ru.

Игнатков Кирилл Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (620078, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32).

Чупахин Андрей Павлович – аспирант кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (620078, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32).

Information about the authors

Vladislav Ya. Noskov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute of Radio Electronics and Information Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (32, Mira St., 620078, Ekaterinburg, Russia); e-mail: noskov@oko-ek.ru.

Sergey M. Smolskiy – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Formation and Processing of Radio Signals Department, Deputy Director of the Institute of Radio Engineering and Electronics, MEI of the National Research University “MEI” (Krasnokazarmennaya St., 14, Moscow, Russia); e-mail: smolskiysm@mail.ru.

Kirill A. Ignatkov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute of Radio Electronics and Information Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (32, Mira St., 620078, Ekaterinburg, Russia).

Andrey P. Chupahin – PhD Student, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Information Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (32, Mira St., 620078, Ekaterinburg, Russia).

Поступила / Received: 01.03.2019

Принята в печать / Accepted: 20.03.2019